

МЮОННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ИЗОТОПАХ ВОДОРОДА: HD, D₂

Дж.Х.Брюер¹⁾, Е.П.Красноперов, С.Р.Крейцман¹⁾, Г.М.Люк¹⁾,
Е.Е.Мейлихов, Г.Д.Моррис¹⁾, К.Нидермайер¹⁾, Т.М.Райзман¹⁾,
В.П.Смилга, В.Н.Харди¹⁾

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова
Москва, СССР

¹⁾ UBC (Университет Британской Колумбии) и TRIUMF, Ванкувер, Канада

Поступила в редакцию 17 мая 1991 г.

Эксперименты по мюонной релаксации изотопов водорода в продольном и поперечном магнитном поле выявили существенное отличие в поведении мюониевой и мюонной компоненты. Скорость релаксации мюониевой компоненты увеличивается с ростом величины ядерного магнитного момента, в то время как деполаризация диамагнитной компоненты (μ^+) практически не зависит от изотопного состава.

Несколько лет назад было обнаружено затухание прецессии (релаксация) мюонного спина в твердом параводороде и исследована температурная зависимость скорости релаксации $\Lambda(T)$ ^{1,2}. Позднее эти результаты были подтверждены исследователями TRIUMF'a³. Более того, в водороде был обнаружен мюоний (соединение мюона с электроном) содержание которого составляло 10 – 15% от диамагнитной компоненты. Механизм мюонной релаксации в водороде связывался с формированием комплекса $H_2\mu^+$ ⁴ и, как следствие, дипольным взаимодействием мюона и протонов в нем. Небольшая величина скорости релаксации и ее температурные изменения объяснялись случайными поворотами комплекса за счет термоактивации⁵. Однако, в эксперименте не проявилась структура спектра прецессии, характерная для трехспиновой системы, а наблюдалась одиночная относительно узкая линия. В предположении локализованного в решетке комплекса $H_2\mu^+$ возникали трудности при объяснении слабой зависимости скорости релаксации от содержания ортомолекул в низких температурах⁶. Вычисленная в рамках теории Ван - Флека разница значений Λ между нормальным водородом и параводородом оказывается в 4 раза большее измеренного при низких температурах.

Молекулярный водород имеет целый ряд изотопов (HD, D₂ и др.) с различными магнитными моментами. В частности, магнитный момент протона равен $\mu_p = 2,793 \mu_n$ ($S = 1/2$), а дейтона $\mu_d = 0,857 \mu_n$ ($S = 1$) в 3 раза меньше. Это обстоятельство открывает возможность исследовать диполь-дипольные взаимодействия мюона как внутри комплекса $H_2\mu^+$ (если он образуется), так и с окружающими магнитными моментами водородных молекул.

ИАЭ и UBC выполнили на канале поверхностных мюонов TRIUMF'a совместные μ SR исследования изотопов водорода: HD и D₂. Детали экспериментальной методики изложены в^{8,9}. Заметим только, что исходный дейтерий имел чистоту 99,98%, а дейтоводород содержал 2% примесей. Газы ожижались в специальную медную ячейку потоком гелия в криостате промежуточных температур фирмы "Oxford Instruments". Давление охлаждающих паров гелия не превышало 1 мм Hg.

В жидкой и твердой фазах D₂ и HD изучена поперечная мюонная релаксация. Магнитное поле составляло 50 Э. Анализ спектров прецессии показал,

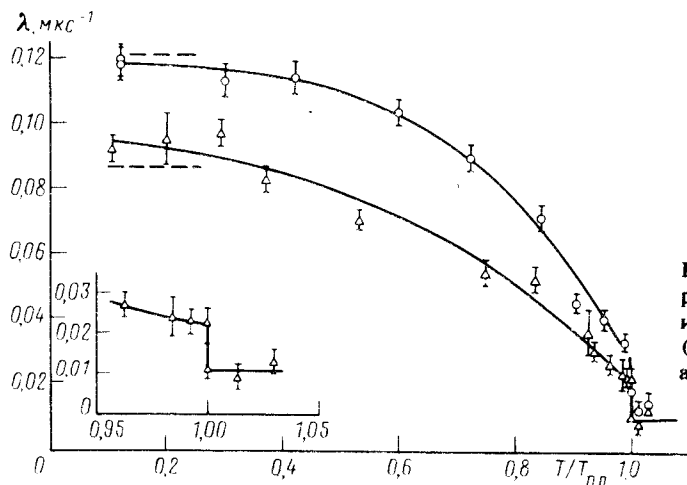


Рис. 1. Зависимость скорости релаксации в дейтоводороде (○) и дейтерии (△) от приведенной (к точке плавления) температуры

что функция поляризации аппроксимируется экспонентой $-e^{-\Lambda t}$ лучше, чем гауссовым законом $-\exp(-\sigma^2 t^2)$. В типичном примере при 5К для экспоненциального закона $\chi^2 = 1,37$, а для гауссового $\chi^2 = 2,5$. Аналогичная динамическая ситуация отмечалась и ранее ¹⁻³. На рис.1 показана температурная зависимость скорости поперечной релаксации $\Lambda(T)$ для дейтерия и дейтоводорода. В жидкости скорость релаксации мала и не превышает значения $0,01 \text{ мкс}^{-1}$. При затвердевании жидкости Λ испытывает небольшой скачок, который изображен для дейтерия в увеличенном масштабе. Подобный скачок (но несколько больший) наблюдается в нормальном водороде ². При снижении температуры скорость релаксации растет, и ниже 8-10 К она выходит практически на константу. Пунктирными линиями отмечены значения Λ для нормального водорода - верхняя линия ^{2,3} и для параводорода - нижняя линия ¹. Наиболее важная особенность полученных зависимостей состоит в том, что при низких температурах значения скорости релаксации для изотопов водорода одинаковы в пределах 10%.

Конфигурация мюонного кластера определяется кулоновским взаимодействием и, повидимому, она одна и та же у $\text{H}_2\mu^+$, у $\text{HD}\mu^+$ и у $\text{D}_2\mu^+$, т.е. можно принять, что во всех случаях это есть треугольник с расстоянием между мюоном и ядрами равным $R = 0,85 \text{ \AA}$. В рамках теории ⁴ легко оценить скорость мюонной релаксации в водороде и дейтерии. Поскольку $\sigma \approx \mu_p/R^3$, то для неподвижного иона $\text{H}_2\mu^+$ прецессия должна затухать в 3 раза быстрее, чем для $\text{D}_2\mu^+$. В случае вращающегося комплекса скорость релаксации уменьшается пропорционально времени ожидания поворота ($\Lambda_{\perp} = \sigma^2 \tau$), которое, в свою очередь, увеличивается с увеличением массы комплекса $\tau \approx \sqrt{m/g}$. Полагая, что параметр ион-молекулярного взаимодействия g слабо зависит от изотопного состава комплекса, можно ожидать, что скорости релаксации в водороде и дейтерии будут отличаться как $\Lambda_{\text{H}}/\Lambda_{\text{D}} \approx 9\sqrt{m_{\text{H}}/m_{\text{D}}}$, т.е. примерно в 6 раз. В эксперименте же для всех изученных изотопов наблюдаются близкие значения Λ . Представляется маловероятным, чтобы изменение статической части магнитного взаимодействия (σ^2) в точности равнялось изменению частоты перескоков ($\omega = \tau^{-1}$). Тем не менее, если комплексы вращаются, тогда при $T \approx 4 \text{ К}$ для дейтоводорода время $\tau \approx 10^{-8} \text{ с}$, а для дейтерия это время на порядок больше.

Подавление релаксации в продольном магнитном поле для не очень быстрой

кинетики мюона, как известно, описывается выражением ¹⁰

$$\Lambda(H) = \frac{\Lambda_0}{1 + (\gamma H \tau)^2}, \quad (1)$$

где $\Lambda_0 = 2\sigma^2\tau$ - скорость релаксации в отсутствии внешнего поля. Для дейтоводородного комплекса следовало ожидать уменьшение релаксации вдвое в продольном поле ≈ 1 кЭ, а для дейтерия в поле ≈ 100 Э. Были измерены функции $P(t)$ для дейтерия и дейтоводорода в различных продольных полях при температуре 7 К. На рис.2 показана зависимость скорости релаксации от величины продольного поля при аппроксимации $P(t)$ одной экспонентой. Легко видеть, что с увеличением поля релаксация подавляется, и в поле выше 30 Э асимметрия практически постоянна. В нулевом поле скорость релаксации примерно в 1,4 раза больше, чем в поперечном поле. Для обычного механизма диполь-дипольной релаксации, как известно, $\Lambda_0/\Lambda_{\perp} \geq 2$ ¹⁰. Тем не менее, примем, что скорость деполяризации уменьшается в продольном поле, как и в случае диффундирующего мюона. Тогда из (1) можно оценить величину дисперсии магнитного поля и корреляционный параметр τ . Для дейтерия аппроксимация (1) дает $\sigma = \sqrt{\langle H^2 \rangle} \approx 3,5$ Э и $\tau \approx 0,8$ мкс. У дейтоводорода, как видно из рис.2, эти параметры весьма близки. Напомним, что в комплексе $H_2\mu^+$ протоны создают локальное поле на мюоне примерно в 20 Э.

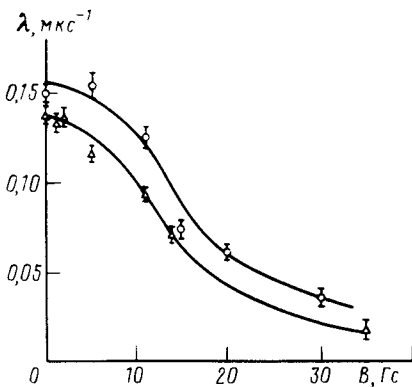


Рис. 2

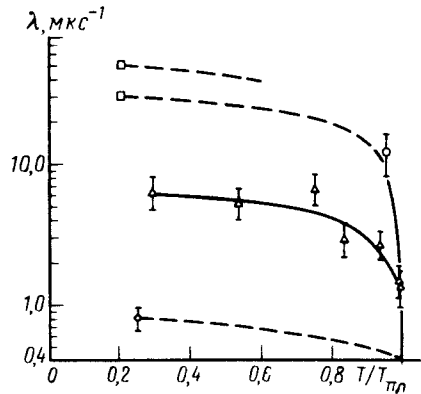


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость скорости деполяризации от величины продольного магнитного поля

Рис.3. Мюониевая релаксация в изотопах водорода. Сверху вниз: $n - H_2$, HD, $n - D_2$ и $p - H_2$

В настоящий момент трудно дать адекватное объяснение малой величины скорости релаксации и, что наиболее существенно, ее слабой зависимости от изотопного состава. Во всяком случае, этот результат ставит под сомнение гипотезу о вращающемся комплексе $H_2\mu^+$ ^{4,5}. Малость скорости мюонной релаксации может быть следствием медленности формирования связанного состояния мюона. При этом возможен двухступенчатый процесс, в котором мюон не деполяризуется в свободном состоянии, а после формирования иона деполяризация осуществляется за счет дипольной связи с ядерными моментами, как рассмотрено в ⁴. Возможен и другой механизм, при котором релаксация осуществляется за счет взаимодействия мюона с орбитальным моментом иона в возбужденном состоянии.

В исследованных изотопах, так же как в водороде ³, наблюдалась прецессия на частоте мюония, асимметрия которой составляла $\approx 15\%$ от диа-

магнитной компоненты. Была исследована температурная зависимость скорости затухания прецессии на частоте мюония в доле ≈ 5 Гс. В жидком дейтерии и дейтоводороде затухание мюониевой прецессии мало и составляет $\lambda_{\text{Мю}} \approx 0,2$ мкс⁻¹. В кристаллической фазе скорость поперечной релаксации быстро возрастает с понижением температуры, при этом в HD (как и в $n - \text{H}_2$) прецессия становится практически ненаблюдаемой. На рис.3 приведены результаты измерений скорости деполяризации мюония в изотопах водорода. Ось абсцисс нормирована на температуру плавления. Квадратиками отмечены ожидаемые значения релаксации, рассчитанные из величин внутренних локальных полей³. Хотя картина релаксации мюония требует уточнения, однако представленные на рис.3 результаты позволяют сделать два существенных заключения. Во-первых, скорость релаксации спина Мю (в отличие от μ^+) пропорциональна ядерному спину водородного изотопа, и во-вторых, в параводороде релаксация обусловлена наличием небольшого количества примеси орто-молекул (по оценке менее 0,5%). Последнее может быть особенно важным при изучении диффузии мюония.

Литература

1. Барсов С.Г., Красноперов Е.П. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 285.
2. Белоусов Ю.М., Красноперов Е.П. и др. ЖЭТФ, 1986, 91, 715.
3. Brewer J.H., Chow K., Hardy W.H. et al. Hyper. Inter., 1990, 65, 1100.
4. Белоусов Ю.М., Смилга В.П. Материалы XX школы ЛИЯФ. Л-д, 1986.
5. Красноперов Е.П. Мюоны и пионы в веществе. Дубна, 1987.
6. Barsov S.G., Krasnoperov E.P. et al. Hyper. Inter., 1986, 32, 557.
7. Sugawara T. et al. Phys. Rev., 1954, 95, 1355.
8. Брюер Дж., Красноперов Е.П. и др. Препринт ИАЭ-5348/9, 1991г.
9. Brewer J.H. Hyper. Inter., 1981, 8, 831.
10. Hayano R.S. et al. Phys. Rev., 1979, B20, 850.